

2021 年“西门子杯”中国智能制造挑战赛

智能制造工程设计与应用类赛项：流程行业自动化方向

全国总决赛 赛题（高职组）

题目：放热反应器控制系统设计与开发

根据下图所示的放热反应器工艺流程，通过分析工艺过程 and 对象特性，设计一套放热反应器控制系统，并通过现场实施（使用 SIMATIC PCS 7 过程控制系统）、调试、优化等，将系统成功投入运行，达到控制目标。

1. 工艺过程

某放热反应器的工艺过程如下图所示：

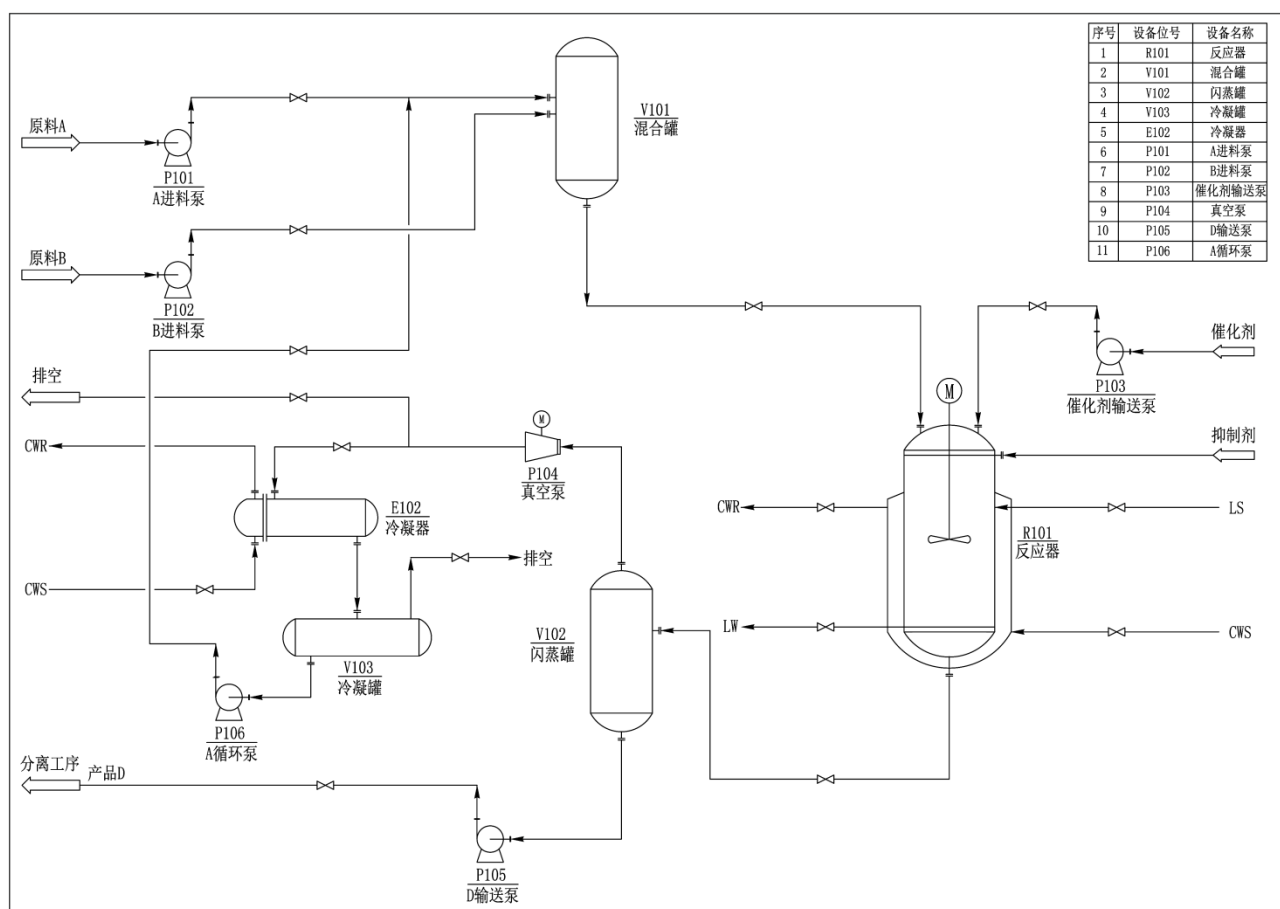
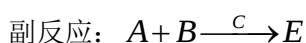


图 1 反应器工艺流程简图

该放热反应过程在催化剂 C 的作用下，原料 A 与原料 B 反应生成主产物 D 和副产物 E，反应方程式如下：



其中，主生成物 D 是所需产品，副生成物 E 是杂质，主、副反应均为强放热反应。为了获得较高的反应转化率，采用原料 A 过量的工艺。

原料 A 与原料 B 分别由原料 A 进料泵 P101、原料 B 进料泵 P102 输送进入混合罐 V101（立式罐）内混合，混合物料进入放热反应器 R101 进行反应，反应所需的催化剂 C，由催化剂 C 输送泵 P103 从反应器

顶部加入。为了诱发反应达到活化温度，在反应初始阶段，反应器 R101 采用夹套蒸汽对反应物料进行加热。上述反应为强放热过程，反应器 R101 采用内盘管式水冷却，将反应放出的热量移除，维持反应器温度稳定，避免造成超温超压等安全事故。反应转化率与反应温度、停留时间、反应物料浓度及混合配比有关，反应体系气相压力对温度敏感，在冷却失效产生的高温条件下，过高的气相压力使反应器有爆炸的风险。在反应器顶部设置一路抑制剂，当反应温度或压力过高危及安全时，通入抑制剂 F，使催化剂 C 迅速中毒失活，从而中止反应。

反应器 R101 底部出口的反应生成液含有产品 D、杂质 E，催化剂 C、以及未反应的原料 A 和少量原料 B，为了回收原料 A，在反应器下游设置闪蒸罐 V102，将反应生成液（D+E+C+A+B）中过量的原料 A 分离提纯。闪蒸罐 V102 顶部采出混合物（原料 A、少量 D+E+C+B）为气相，首先进入冷凝器 E102 与冷却水进行换热冷凝，冷凝后的混合物进入冷凝罐 V103，通过循环泵 P106 再送入混合罐 V101 循环利用。闪蒸罐 V102 底部的产品 D 混合物（D+E+C+A+B）经输送泵 P105 加压，送到下游分离工序，进行提纯精制，以分离出产品 D。

2. 控制方案

工艺管道及仪表流程图（P&ID）如图 2 所示：

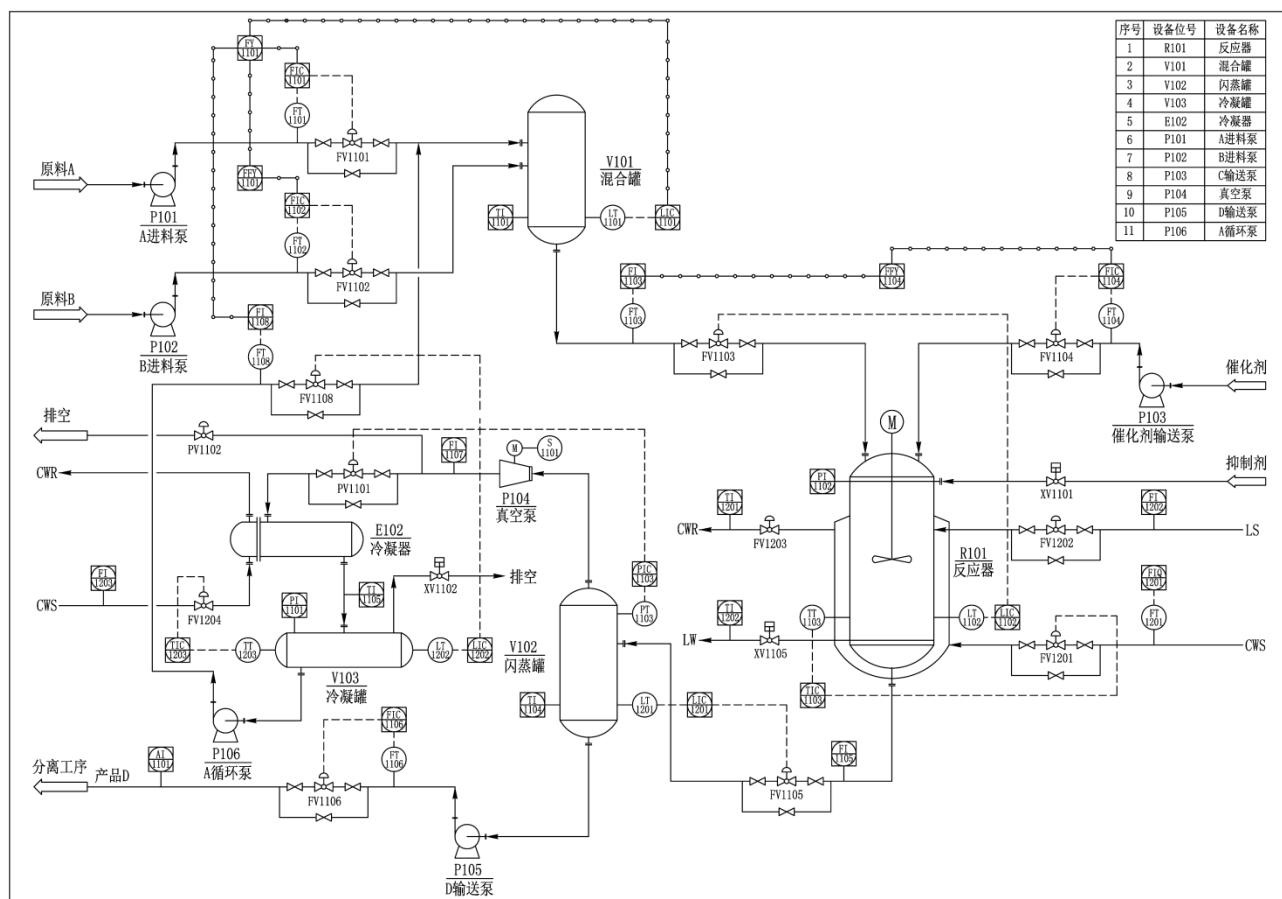


图 2 工艺管道及仪表流程图

3. 开车步骤

(1) 初始化检查，工况处于开车前状态，确认所有阀门和泵都处于关闭状态。

(2) 启动原料 A 输送泵 P101，并打开原料 A 进料阀；启动原料 B 输送泵 P102，并打开原料 B 进料阀，原料 A、B 按照一定比例进入混合罐 V101。

(3) 混合罐 V101 达到一定的液位时，打开罐底阀门，混合原料 (A+B) 进入反应器 R101，启动催化剂输送泵 P103，并打开催化剂 C 管线阀门，催化剂 C 与混合原料 (A+B) 按一定配比从反应器 R101 顶部加入。

(4) 当反应器 R101 达到一定液位时，打开反应器 R101 夹套加热蒸汽管线阀门及凝结水管线阀门，夹套通入加热蒸汽使反应器物料升温诱发反应。

(5) 当反应物达到活化温度后，关闭反应器 R101 夹套加热蒸汽管线阀门及凝结水管线阀门，停止进加热蒸汽。原料 A、B 在催化剂 C 作用下进行化学反应，生成产品 D 及副产物 E，并放出大量热能。

(6) 当反应器 R101 液位持续升高达到一定液位时，打开反应器 R101 底部管线阀门，反应生成物进入闪蒸罐 V102 进行闪蒸。

(7) 当反应器 R101 温度达到一定生产工艺值时，打开反应器 R101 内盘管循环冷却水上水管线阀门及循环冷却水回水管线阀门，以控制反应器 R101 温度。

(8) 在反应生成液进入闪蒸罐 V102 之前，启动真空泵 P104，打开闪蒸罐顶部排空阀门，闪蒸罐开始抽真空并维持在一定真空度，然后反应生成液进入闪蒸罐进行闪蒸操作。

(9) 当闪蒸罐 V102 维持稳定后，打开冷凝器 E102 循环冷却水上水管线阀门，冷凝器 E102 投用。关闭闪蒸罐顶部排空阀门，打开闪蒸物料进入冷凝器 E102 管线阀门，闪蒸罐顶部物料经冷凝器冷凝后进入冷凝罐 V103。

(10) 当冷凝罐 V103 达到一定液位时，启动 A 循环泵 P106，打开 A 物料循环管线阀门，A 物料进入混合罐 V101 进行循环使用。

(11) 当闪蒸罐 V102 达到一定的液位时，启动 D 输送泵 P105，打开闪蒸罐底部产品 D 混合物管线阀门，产品 D 混合物进入下游分离工序，以提纯产品 D。

(12) 开车过程完成后，投入自动控制系统，使工艺过程平稳运行，并保证满足工艺生产要求。

4. 甲方需求

- (1) 关键工艺参数达到相关控制要求。
- (2) 不能出安全事故
- (3) 生产原料、公用工程消耗以及产品，分别计价，最终收益（收益 = 产品总价 - 生产原料和公用工程消耗的总价）越多越好。各物料市场价格如下：

物料价格表		
序号	物料	价格（元/吨）
1	原料 A	600
2	原料 B	1100
3	催化剂 C	1800
4	低压蒸汽 LS	210
5	循环冷却水 CWR	10
6	产品 D ^①	1650/1600 ^{②③}

说明：

- ① 产品 D 为产品混合物中的 D 组分，其流量 = 产品 D 混合物流量 FI1106 * 产品 D 纯度 AI1101。
- ② 产品 D 纯度 AI1101 ≥ 75% 时，产品 D 价格有效，否则为不合格产品，市场价格为 0 元/吨。
- ③ 第 1 阶段产品 D 价格为 1650 元/吨；第 2 阶段产品 D 价格下跌，为 1600 元/吨。

5. 比赛任务

针对以上工艺过程，参赛选手需要完成系统分析、系统设计和现场实施等环节，包括开车方案设计、控制回路设计、控制算法设计、WINCC 画面组态、系统调试与故障排除，以及从冷态到稳态的自动开车操作、开车结束后系统投入自动运行和系统抗扰动测试（如提升负荷）等。

经专家组协商，大赛组委会统一选定扰动测试项目：市场供大于求，产品 D 价格下降，要求将生产负荷降低 20%。具体为：当第 1 阶段完成后，要求在 WINCC 画面中，通过修改设定值等方式，将产品 D 混合物流量 FI1106 降低 20%。

附录 1 工艺参数、设备数据及物性数据（同样题）

1.1 工艺参数

工艺参数表			
序号	工艺说明	单位	工艺参数
1	混合罐 V101 液位	%	20~70
2	反应器 R101 液位	%	20~70
3	闪蒸罐 V102 液位	%	20~70
4	冷凝罐 V103 液位	%	20~70
5	反应器 R101 温度	℃	120~160
6	闪蒸罐 V102 温度	℃	100~140
7	冷凝罐 V103 温度	℃	20~100
8	反应器 R101 压力	kPa	130~150
9	闪蒸罐 V102 压力	kPa	30~101
10	产品 D 纯度	%	≥75

1.2 设备数据

设备数据表			
序号	位号	名称	设备参数
1	R101	反应器	型式：立式、夹套、内盘管；内径：1m，高度：3m； 操作介质：A、B、C、D、E； 设计压力：250kPa，设计温度：180℃；
2	V101	混合罐	型式：立式；内径：0.6m，高度：3m；操作介质：A、B； 设计压力：120kPa，设计温度：100℃；
3	V102	闪蒸罐	型式：立式；内径：0.8m，高度：3m； 操作介质：A、B、C、D、E； 设计压力（最高/最低）：250kPa/20kPa；设计温度：180℃；
4	V103	冷凝罐	型式：卧式；内径：0.5m，长度：2m； 操作介质：A、少量 B+C+D+E； 设计压力：250kPa，设计温度：160℃；
5	E102	冷凝器	型式：列管式、卧式； 内径：0.4m，长度：3m，换热面积：100m ² ； 操作介质：管程：A、少量 B+C+D+E，壳程：循环冷却水； 设计压力：管程：150kPa，壳程：250kPa； 设计温度：管程：150℃，壳程：100℃；
6	P101	A 进料泵	操作介质：原料 A；扬程：30m； 出口压力：313kPa；操作温度：20~25℃；

7	P102	B 进料泵	操作介质：原料 B；扬程：25m； 出口压力：307kPa；操作温度：20～25℃；
8	P103	C 输送泵	操作介质：催化剂 C；扬程：20m； 出口压力：293kPa；操作温度：20～25℃；
9	P104	真空泵	操作介质：A、少量 B+C+D+E；抽气量：5000m ³ /h；
10	P105	D 输送泵	操作介质：产品 D 混合物；扬程：20m； 出口压力：227kPa；操作温度：100～140℃；
11	P106	循环泵	操作介质：A、少量 B+C+D+E；扬程：25m 出口压力：279kPa；操作温度：20～100℃；

1.3 物性数据

物性数据表					
序号	名称	分子量 g/mol	密度 kg/m ³	沸点℃	汽化潜热 J/mol
1	A	36	720	105	7513
2	B	24	840	120	14369
3	C	72	980	125	10817
4	D	96	910	130	15356
5	E	60	880	135	12608
6	F	108	720	132	34562
7	H ₂ O	18	1000	100	44848

附录 2 变量列表及地址（同样题）

IO 变量及地址列表							
序号	位号	说明	单位	仪表 下限	仪表 上限	类型	地址
1	FI1106	产品D混合物流量	kg/s	0	40	模拟量输出	IW+0
2	FI1101	原料A流量	kg/s	0	12	模拟量输出	IW+2
3	FI1102	原料B流量	kg/s	0	6	模拟量输出	IW+4
4	FI1103	原料混合进料流量	kg/s	0	20	模拟量输出	IW+6
5	FI1104	催化剂C流量	kg/s	0	3	模拟量输出	IW+8
6	FI1105	反应生成液流量	kg/s	0	40	模拟量输出	IW+10
7	FI1107	闪蒸罐V102顶部物料出口流量	kg/s	0	10	模拟量输出	IW+12
8	FI1201	反应器R101循环上水流量	kg/s	0	100	模拟量输出	IW+14
9	FI1202	反应器R101加热蒸汽流量	kg/s	0	10	模拟量输出	IW+16
10	FI1203	冷凝器E102循环上水流量	kg/s	0	25	模拟量输出	IW+18
11	LI1101	混合罐V101液位	%	0	100	模拟量输出	IW+20
12	LI1102	反应器R101液位	%	0	100	模拟量输出	IW+22
13	LI1201	闪蒸罐V102液位	%	0	100	模拟量输出	IW+24
14	TI1101	混合罐V101温度	℃	0	100	模拟量输出	IW+26
15	TI1102	取消	℃	0	100	模拟量输出	IW+28
16	TI1103	反应器R101温度	℃	0	200	模拟量输出	IW+30
17	TI1104	闪蒸罐V102温度	℃	0	200	模拟量输出	IW+32
18	TI1105	物料E102冷凝后温度	℃	0	200	模拟量输出	IW+34
19	TI1201	反应器R101循环回水温度	℃	0	200	模拟量输出	IW+36
20	TI1202	反应器R101加热蒸汽凝结水温度	℃	0	200	模拟量输出	IW+38
21	PI1101	冷凝罐V103压力	kPa	0	250	模拟量输出	IW+40
22	PI1102	反应器R101压力	kPa	0	250	模拟量输出	IW+42
23	PI1103	闪蒸罐V102压力	kPa	0	250	模拟量输出	IW+44
24	FI1108	循环物料流量	kg/s	0	5	模拟量输出	IW+46
25	LI1202	冷凝罐V103液位	%	0	100	模拟量输出	IW+48
26	TI1203	冷凝罐V103温度	℃	0	200	模拟量输出	IW+50
27	AI1101	产品D纯度	%	0	100	模拟量输出	IW+52
1	FV1106	闪蒸罐V102底部产品D混合物管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+0
2	PV1101	闪蒸罐V102顶部循环物料管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+2
3	FV1101	原料A管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+4
4	FV1102	原料B管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+6

5	FV1103	混合罐V101底部混合进料管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+8
6	FV1104	催化剂C管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+10
7	S1101	变频真空泵P104频率	Hz	0	50	模拟量输入	QW+12
8	FV1105	反应器R101底部反应生成液管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+14
9	PV1102	闪蒸罐V102顶抽真空阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+16
10	FV1108	循环物料管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+18
11	FV1204	冷凝器E102冷却水阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+20
12	FV1201	反应器R101循环上水管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+22
13	FV1202	反应器R101加热蒸汽管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+24
14	FV1203	反应器R101循环回水至界区管线阀门	%	0	100	模拟量输入	QW+26
1	HS1106	循环泵P106开关				数字量输入	Q+2.0
2	XV1101	抑制剂管线阀门				数字量输入	Q+2.1
3	XV1102	冷凝罐V103排气阀				数字量输入	Q+2.2
4	HS1105	产品D混合物输送泵P105开关				数字量输入	Q+2.3
5	XV1105	反应器R101夹套凝结水管线阀门				数字量输入	Q+2.4
6	HS1101	原料A进料泵P101开关				数字量输入	Q+2.5
7	HS1102	原料B进料泵P102开关				数字量输入	Q+2.6
8	HS1103	催化剂C输送泵P103开关				数字量输入	Q+2.7
9	HS1104	真空泵P104开关				数字量输入	Q+3.0

说明：

(1) 参赛队员在 SMPT-1000 软件平台上，根据上表所提供的变量仪表，自行选择所需的仪表，**但不可更改仪表的量程**。参赛队员要根据自己的设计方案选择变量仪表，表中所提供的变量仪表不一定都要使用到。

(2) 工艺过程图中管线上均可根据设计方案的需要设有阀门，**阀门流通能力不可变、受控类型不可变（如 ProfibusDP、内控等）**，参赛队员可自行选择阀门的特性（线性、等百分比、快开、抛物线）和阀门类型（手操阀、调节阀），其中调节阀用于控制回路。

(3) 反应器 R101 夹套凝结水管线阀门 **XV1105**、反应器 R101 循环回水至界区管线阀门 **FV1203** 均为**内控**模式。

(4) 工艺过程的**设备参数**由全国竞赛专家组设置，参赛队员不可自行变动。